

GEOLOGÍA FORENSE: MÉTODOS APLICADOS EN LA BÚSQUEDA DE DESAPARECIDOS EN LA REGIÓN CENTRAL DE ARGENTINA

Guillermo SAGRIPANTI¹, Diego VILLALBA¹, David AGUILERA² y Aldo GIACCARDI²

¹Universidad Nacional de Río Cuarto, Departamento de Geología, Río Cuarto, Córdoba, Argentina. E-mail: gsagripanti@exa.unrc.edu.ar

²Universidad Nacional de San Luis, Departamento de Geología, San Luis, Argentina.

RESUMEN

La geología forense es una disciplina dentro de las Ciencias de la Tierra que, a través de la recolección y análisis de minerales, suelo, agua, etc., puede aportar valiosas pruebas para la resolución de problemas planteados por la justicia.

Los objetivos de esta contribución son documentar las actividades de geología forense realizadas en la exploración de sitios potenciales de enterramientos clandestinos de personas en la región central de la República Argentina, poner al alcance de geólogos algunas metodologías geológicas-geofísicas adecuadas para este tipo de búsquedas y fomentar su participación con el fin de multiplicar esfuerzos en el aporte desde la geología a los Derechos Humanos. Las investigaciones han sido realizadas en terrenos de Centros Clandestinos de Detención ubicados en la región central de Argentina, por solicitud de la Justicia, Equipo Argentino de Antropología Forense y Organismos Nacionales de Derechos Humanos. Los conocimientos y métodos que se aplican en investigaciones geológicas convencionales, han sido adaptados para colaborar en este tipo de búsquedas, entre ellos el análisis morfo-litológico, tomografías eléctricas, geo-radar, ensayos geomecánicos y apertura de trincheras. Las evidencias de intervención antrópica en la superficie con motivo de una excavación son las que pierden su expresión rápidamente, mientras que las que afectan la parte superior del perfil del suelo pueden reconocerse, aún, después de varias décadas, y ser ubicadas utilizando métodos geológicos-geofísicos. El equipo de investigación dedicado a la exploración de sitios potenciales de enterramientos de personas debe ser interdisciplinario, ya que, contar con mayor cantidad de datos y opiniones aumenta la posibilidad de hallazgo

Palabras clave: Enterramientos clandestinos, personas desaparecidas, métodos geofísicos, trincheras.

ABSTRACT

Forensic Geology: Methods employed in the search of missing people in the central region of Argentina

Forensic geology is a branch of the Earth Sciences that, through the collection and analysis of minerals, soil, water, etc., can provide valuable evidence for the resolution of problems at the request of The Ministry/ Department of Justice. The aims of this paper are threefold: first, to report the activities carried out by forensic geology as regards the search of clandestine burial sites of missing people in the central region of Argentina; second, to share some of the geological-geophysical methodologies suitable for this kind of search; and third, to promote colleague participation in order to multiply efforts in relation to the contributions that geology can make to Human Rights. The investigations reported in this paper have been carried out on grounds of Clandestine Detention Centers located in the center of Argentina, as the result of the request made by the Ministry/Department of Justice, the Argentine Team of Forensic Anthropology, and National Human Rights Organizations. The knowledge and methods usually employed in conventional geological investigations have been adapted to be applied in this kind of search, including morpho-lithological analysis, electrical tomography, geo-radar, geomechanical trials and trench excavations. Evidence of anthropic disturbance on a particular surface as the result of an excavation loses its expression rapidly, while the evidence that affects the top of the soil profile can be recognized and located using geological-geophysical methods, even after several decades. The research team dedicated to the exploration of potential burial sites of missing people should be interdisciplinary, since a greater amount of data and views increases the chances of findings.

Keywords: Clandestine burials, missing people, geophysical methods, trenches.

INTRODUCCIÓN

La geología forense es el estudio de las

pruebas que aportan los minerales, suelo y otros materiales presentes en la tierra, que se utilizan para dar respuesta a las pre-

guntas planteadas por orden de la justicia (Murray y Tedrow 1992).

Existen diversas áreas del conocimiento

dentro del campo de las geociencias que pueden contribuir a resolver problemas propuestos por la justicia como la geofísica, hidrogeología, mecánica de suelos, cartografía, sismología, geología ambiental y sedimentología, entre otras. Tal es el caso de la sismología que, a través de la red sismológica, utiliza los sismogramas (que registran señales de origen natural o artificial, obtenidas en cualquier escena) y aportan información sobre cómo, cuándo y dónde se han producido los eventos que las han generado. La interpretación del origen de las señales con este fin y para permitir dilucidar problemas judiciales se denomina sismología forense (Ruffell y McKinley 2008, CSIC 2009).

Las primeras investigaciones en geología forense trataban solamente sobre el uso del suelo o sedimentos que se adhirieron a los zapatos de un sospechoso y que se pueden relacionar con la escena de un delito; en la actualidad la aplicación de las diversas disciplinas “geo” incluye otros elementos además de suelo o roca, utilizando técnicas analíticas para establecer la culpabilidad o inocencia de los sospechosos. Por lo tanto, la geología forense es la aplicación de conocimientos de Ciencias de la Tierra para aportar pruebas o evidencias válidas, a investigadores de la escena de hechos delictivos y a antropólogos forenses, para orientar o esclarecer problemas de carácter penal, humanitario, crímenes de guerra y medio ambientales. Es decir, se aplica en lo que respecta a la búsqueda de la verdad y la justicia, ya sea para dar argumentos a la querrela o a la defensa (Ruffell y McKinley 2008, CCI 2010).

En países como Inglaterra, Estados Unidos, Australia, Irlanda, Escocia, Alemania, Italia y Holanda desde hace varias décadas vienen trabajando e incorporando otras disciplinas científicas para ser aplicadas en el campo de la criminalística, entre éstas, la geología forense. En tiempos más recientes se suma Colombia, que también ha comenzado a aplicar la geología para contribuir a resolver diferentes delitos, y Brasil, que ha adquirido experiencia en este campo aplicándolo para resolver problemas ambientales y en el fraude de gemas (CCI 2010).

La búsqueda de objetos enterrados ha sido

una tarea compleja para los investigadores (Arqueólogos o Antropólogos) durante muchos años, ya que solo se contaba con técnicas directas destructivas para su localización. Más aún, su aplicación al campo de la criminalística ha dado por resultado, en muchos casos, la pérdida o destrucción de pruebas incriminatorias o evidencias valiosas consideradas cruciales ya que significaban la diferencia en que se otorgara mayor o menor carga penal. En la actualidad se cuenta con tecnologías que permiten la exploración del subsuelo desde la superficie, en forma indirecta aunque precisa.

La intervención antrópica del medio natural como en el caso de una excavación para el enterramiento de cuerpos, modifica las condiciones naturales de los materiales del subsuelo y su entorno, generando perturbaciones en el medio físico. Estas pueden ser detectadas y delimitadas en forma indirecta mediante la aplicación de técnicas geológicas-geofísicas apropiadas, sin provocar alteraciones en el estado en que se encuentran los sedimentos (Aguilera *et al.* 2006, Sagripanti *et al.* 2012).

La República Argentina desde el año 1976 hasta el año 1983, estuvo bajo un gobierno de facto denominado “dictadura militar”, período en el cual miles de personas fueron arrestadas y desaparecidas. Esta dictadura dividió al territorio argentino, en cinco zonas geográficas, para controlar y reprimir el accionar de grupos considerados subversivos. Como parte de su planificación se instalaron en el país Centros Clandestinos de Detención (CCD), que llegaron a ser alrededor de 340, indispensables dentro de la política de desaparición de personas. Estos estaban bien organizados y en ellos fue común el uso metódico de la tortura, asesinato y desaparición (CONADEP 2006).

El Equipo Argentino de Antropología Forense (EAAF) realiza tareas en cinco áreas de investigación: investigación preliminar, búsqueda y recuperación de restos, laboratorio de análisis, genética y centro de documentación de archivos. Uno de los objetivos que persigue es la identificación de restos de desaparecidos durante la dictadura militar para conocer el *modus operandi* de la represión. Para cumplir con este

propósito el equipo trabaja en los CCD que operaban en las cinco zonas geográficas en que el gobierno de facto dividió el país (EAAF 2009).

Entre los años 2007-2009, este equipo ha conducido la inspección y excavaciones realizadas en cementerios y CCD que funcionaban en la provincia de Buenos Aires, Córdoba, Mendoza, Chaco, Corrientes, Entre Ríos, Formosa, Misiones, Neuquén, Santa Fe, Santiago del Estero y Tucumán, donde han rescatado restos óseos de 181 personas desaparecidas (EAAF 2009).

Los arqueólogos y antropólogos forenses abocados a la búsqueda e identificación de personas desaparecidas durante la última dictadura militar, plantearon la necesidad de la participación de geólogos en la etapa de exploración del subsuelo para la ubicación de sitios potenciales de enterramientos clandestinos de personas. Esto a partir de reconocer que el profesional geólogo posee aptitudes como el conocimiento del medio natural y la capacidad para la interpretación de anomalías en el subsuelo, consideradas características básicas para este tipo de búsqueda ya que las mismas pueden ser generadas por potenciales enterramientos.

El equipo de investigación de geología forense se integró con docentes de las universidades de Río Cuarto y San Luis (UNRC-UNSL), y comenzó a trabajar aplicando los conocimientos y técnicas de exploración, habitualmente usadas en el campo de la geología, a este tipo específico de búsquedas. Es oportuno mencionar que las investigaciones que normalmente desarrollan los integrantes del grupo están orientadas a la prospección geofísica y a estudios neotectónicos y paleosismológicos. El equipo de geólogos ha participado también, colaborando en proyectos arqueológicos, entre ellos, en la ubicación de restos de edificios correspondientes a la primera fundación de la ciudad de Santa Fe, en la localidad de Cayastá.

Los conocimientos y experiencia de los integrantes del equipo han sido puestos al servicio de la búsqueda de enterramientos clandestinos, intentando hacer un aporte desde la geología a los organismos de DD. HH. y a familiares de desaparecidos.

El equipo de investigación UNRC-UNSL

desde el año 2004 ha colaborado en numerosos casos, a solicitud de Juzgados Federales, Equipo Argentino de Antropología Forense y Organismos Nacionales de DD. HH., como la Asamblea Permanente de Derechos Humanos (APDH-San Luis) y Movimiento Ecueménico por los Derechos Humanos (MEDH-Mendoza). La participación estuvo orientada a la búsqueda de sitios de enterramientos clandestinos, actividades de exploración que han sido realizadas en numerosos CCD ubicados principalmente en las provincias de Córdoba, San Luis, Santa Fe y Mendoza (Fig. 1).

Es importante resaltar que, a nivel nacional, son escasos los antecedentes de investigaciones de geología forense aplicada en la búsqueda de enterramientos clandestinos de personas. Es por ello que los métodos geológicos-geofísicos y herramientas geológicas convencionales de subsuelo, se han tenido que adecuar para la exploración muy somera (no más de 3 m), con objeto de búsqueda de tamaño reducido y que solo se manifiesta en un cambio en

las propiedades físicas que tienen sutil diferencia con el material inalterado que lo rodea. Ello más allá de los condicionamientos propios de la región de búsqueda, tipo de enterramiento y características de los antecedentes que figuran en testimonios de la causa.

Los enterramientos en Argentina, según distintos antecedentes, han sido de diversos tipos, dependiendo de los métodos aplicados para disponer de los cuerpos (fosas individuales o múltiples tanto en cementerios como a campo abierto) al igual que las técnicas para el ocultamiento de las fosas (disimuladas con vegetación implantada que en la actualidad tienen gran tamaño, cultivadas periódicamente o cubiertas por obras edilicias, superficies de hormigón o pavimento).

Los objetivos de esta contribución son:

- divulgar las actividades de geología forense, aplicadas a la exploración de sitios potenciales de enterramientos de personas en la región central de la República Argentina;
- poner al alcance de profesionales geó-

logos algunas metodologías geológicas-geofísicas que han debido ser adecuadas para este tipo de búsquedas y;

- fomentar la participación de colegas con el fin de multiplicar esfuerzos en el aporte desde la geología a los Derechos Humanos.

ANTECEDENTES

Los antecedentes sobre búsqueda de enterramientos clandestinos de personas a nivel nacional, por varias razones, no son numerosos. Una de ellas es que no hay muchos geólogos que se dediquen a este tipo de actividad y otra es debida a que la mayoría de las investigaciones están inéditas en los expedientes de las distintas causas que lleva adelante la justicia y que no pueden hacerse públicos.

Gran parte de los antecedentes y bibliografía de investigaciones de geología forense desarrolladas en otros países están enfocadas a apoyar las investigaciones de la "escena de los hechos", como por ejemplo, comparar la presencia de salpicaduras de sedimentos (barro), en una prenda de un sospechoso, con la existente en el lugar donde fue enterrada una víctima. Algunos antecedentes importantes que se pueden citar son los trabajos realizados por France *et al.* (1992), Pye y Croft (2004) y Ruffell y McKinley (2008), entre otros.

Según Rodríguez Cuenca (1994), en su libro sobre antropología forense, plantea que la mayoría de los hallazgos normalmente son ocasionales, durante labores de construcción o por la aparición a flor de tierra de restos óseos en trabajos agrícolas o urbanísticos. Sin embargo, cuando se trata de la localización de fosas con cierta antigüedad, se requiere de una previa labor de búsqueda. En este último caso se deben tener cuenta algunos criterios de prospección, localización, excavación y análisis de materiales. Por ejemplo, reconocer huellas como los cambios de contorno superficial y variaciones de la vegetación local, usar una sonda metálica para ubicar las características menos compactas del suelo utilizado para rellenar la fosa y también despejar la zona que se investiga ya que las fosas tienen una apariencia más oscura que el terreno que las rodea.

Recientemente, la tecnología del geo-

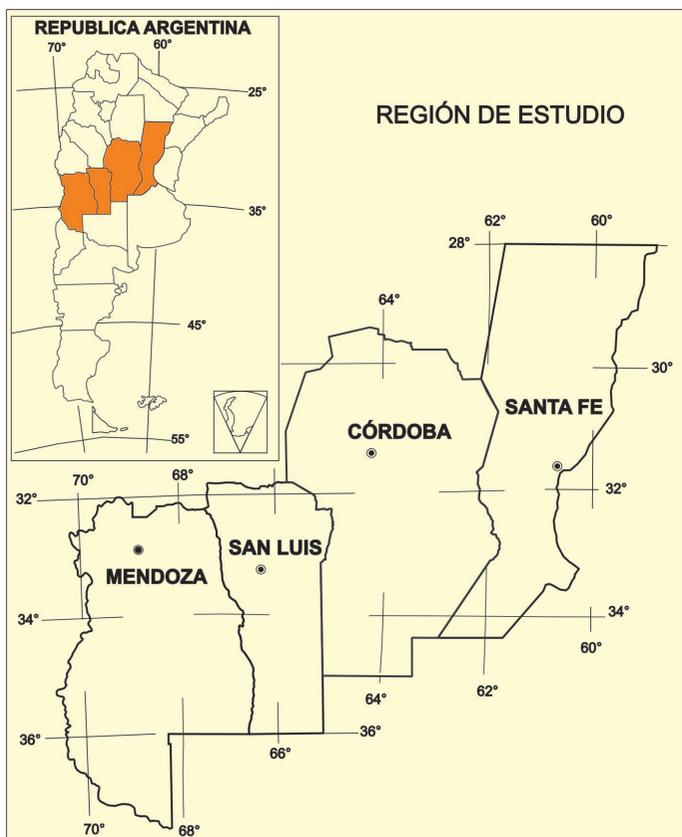


Figura 1: Mapa de ubicación de las provincias en que se realizaron las investigaciones.

radar (Ground Penetrating Radar-GPR), como ocurre en la mayoría de los casos, se ha desarrollado debido a la necesidad y se ha aplicado cuando tienen ocurrencia desastres naturales o guerras. En este último caso, se ha perfeccionado y mejorado la tecnología para detectar objetos ocultos como el plástico de minas antipersonales y antitanques que fueron enterradas durante conflictos bélicos. Una importante aplicación ha sido efectuada en el campo de las investigaciones arqueológicas, para detectar cavidades en pirámides egipcias (Strongman 1992).

Los métodos eléctricos permiten determinar, a través de mediciones efectuadas desde la superficie, la distribución de la resistividad eléctrica del terreno en profundidad. A través de la tomografía eléctrica 2D se pueden obtener secciones verticales del terreno en forma de perfiles continuos de resistividad eléctrica en dos dimensiones, lo que facilita su vinculación a la estructura y textura del subsuelo (Aguilera *et al.* 2006, Sagripanti *et al.* 2012).

La técnica de exploración por medio del sondeo de penetración posibilita realizar un importante aporte al conocimiento de la resistencia mecánica de los materiales del subsuelo. Al igual que la tomografía eléctrica, el sondeo de penetración no genera disturbación del medio físico (Aguilera *et al.* 2006, Sagripanti *et al.* 2012).

METODOLOGÍA

La metodología seguida en las investigaciones para la búsqueda de enterramientos clandestinos se puede dividir en cuatro etapas, en las que participan profesionales de diferentes especialidades. Éstas son:

Etapa de inventario e investigación preliminar: se realiza con la participación de distintos profesionales como antropólogos forenses, historiadores, geólogos, etc., donde se acopian y analizan testimonios de las causas, tanto escritos como orales y evidencias fotográficas, para elaborar hipótesis sobre los sitios potenciales que puedan ser enterramientos clandestinos. Corresponde a los geólogos realizar el inventario de antecedentes sobre tipo y uso del suelo, mapas y fotografías aéreas a distintas escalas, actuales, de la época en que

se denuncia la excavación y previas a ella. Etapa de exploración del subsuelo: los profesionales geólogos realizan el relevamiento de campo con los datos obtenidos en la etapa anterior. Se realiza el reconocimiento del lugar, la búsqueda de evidencias superficiales y el desarrollo de la exploración del subsuelo a través de distintas técnicas indirectas y directas.

Etapa de exhumación: los arqueólogos y antropólogos forenses rescatan los restos óseos y todas las evidencias asociadas a éstos, como pueden ser proyectiles de armas de fuego, ropa y efectos personales.

Etapa de identificación: se realiza en el laboratorio de Investigación y Genética, donde se analizan los restos óseos rescatados, tratando de identificar a quien pertenecen y determinar la causa y forma de muerte.

En la presente contribución se describen los métodos geológicos-geofísicos aplicados en las dos primeras etapas, en la etapa de inventario e investigación preliminar se realiza el análisis morfo-litológico y de uso del suelo de detalle y en la etapa de exploración del subsuelo se utilizan métodos geofísicos y geomecánicos eminentemente no invasivos, y la apertura de trincheras/

calicatas para el análisis directo del perfil de subsuelo, los mismos se muestran en un esquema de síntesis (Fig. 2).

Análisis morfo-litológico, uso del suelo y fotográfico

Dado que el objetivo final de la metodología presentada es determinar potenciales zonas de enterramientos, es lógico deducir que los mismos implican, por un lado, una modificación en las formas y, por otro, su ubicación tiene un fuerte condicionamiento por parte de la litología aflorante. Al mismo tiempo, la magnitud de la perturbación estará condicionada por el tipo de enterramiento.

En este marco, la finalidad de este análisis es obtener una zonificación, de apoyo para las tareas de exploración del subsuelo, cuya escala de trabajo a emplear dependerá del caso de estudio.

La fotointerpretación de fotografías aéreas verticales, a distintas escalas, preferentemente 1: 5.000 o mayor, es esencial para este análisis, aunque es importante contar también con fotos de distintas fechas de toma, obtenidas con anterioridad a la supuesta excavación clandestina y, lo más próxima, con posterioridad a la mis-

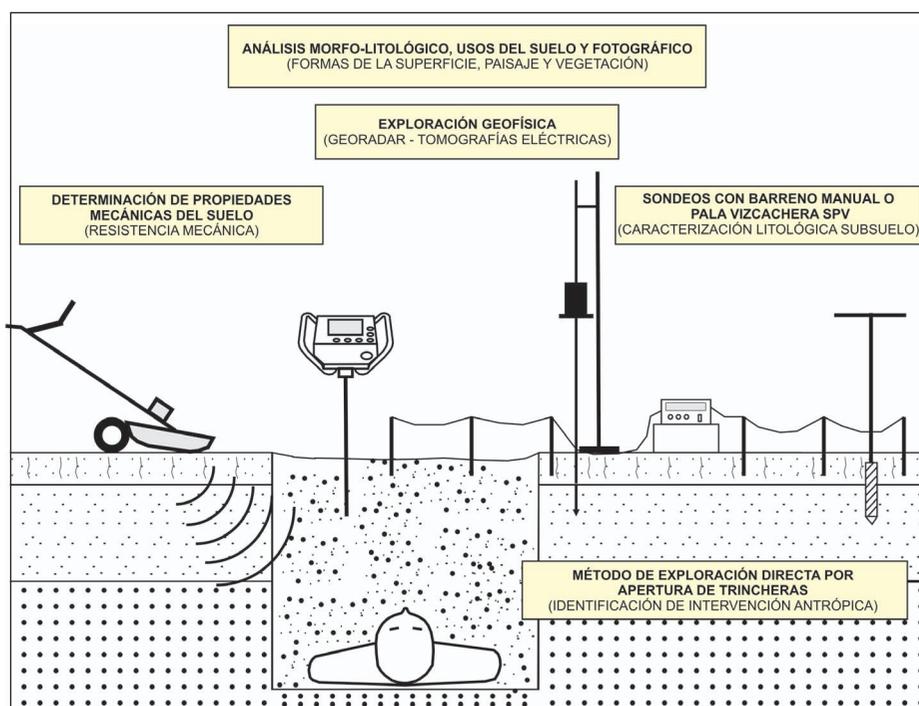


Figura 2: Esquema de síntesis que presenta las distintas metodologías utilizadas.

ma. En algunos casos, como el de enterramientos múltiples, es valioso obtener fotografías aéreas oblicuas tomadas a baja altura para analizar la morfología superficial y detectar la presencia, sutil, de algún rasgo distintivo relacionado con el motivo de la búsqueda. Los análisis pueden complementarse con fotos panorámicas de la época y actuales del sector, con el fin de apoyar las posteriores interpretaciones.

Se elabora en primera instancia un mapa morfo-litológico del sector, donde se representan el drenaje superficial, rasgos morfológicos dominantes, pendientes, litología, especialmente unidades morfológicas cuya génesis implica poca potencia de la cubierta sedimentaria, etc. Es conveniente realizar la cartografía del uso del suelo, principalmente en los CCD que funcionaban en campos militares, que contenga los rasgos de intervención antrópica como caminos, senderos, basurales, excavaciones realizadas en las prácticas militares, cráteres dejados por el uso de explosivos, etc. Suele ser de utilidad conocer los datos de profundidad del nivel de agua subterránea, dado su condicionamiento sobre la respuesta a los estudios geofísicos. Finalmente todo puede volcarse en un mapa de síntesis en el que constará la superposición de los distintos niveles de información y se identificarán las variaciones de rasgos de acuerdo a distintas épocas según se dispongan. A esta información se le sumará la aportada por los testimonios de la causa y de la aplicación de criterios geológicos, para delimitar las zonas que requerirán estudio de mayor detalle.

En estas zonas se pueden aplicar además técnicas geodésicas complementarias como relevamientos topográficos de detalle, modelo digital del terreno y/o una red geo-referenciada amojonada (grilla) si se tiene disponibilidad económica e instrumental, ya que estos métodos (técnicas también usadas en levantamientos arqueológicos o antropológicos) son de mucha utilidad.

Cuando se inicia la actividad de campo, para delimitar un sitio potencial de enterramiento, debe realizarse una inspección visual preliminar de la zona, con el fin de detectar algún cambio sutil en la morfología de la superficie del suelo, como de-

presiones, tratando de delimitar su forma y tamaño, y variaciones en la vegetación que hospeda, como distintos patrones de crecimiento de las plantas. Se debe consultar a un especialista sobre la edad de las mismas, ya que se pueden haber realizado plantaciones sobre el enterramiento con el propósito de ocultamiento.

Durante esta inspección se debe prestar atención también a la presencia de construcciones, revisando con detalle las obras presentes ya que éstas pueden haber sido construidas sobre la fosa con intención de ocultar el enterramiento. Por lo tanto, probablemente la pérdida de volumen de uno o varios cuerpos sepultados se puede manifestar en asentamientos, grietas en paredes, rotura de pisos o veredas.

Exploración geofísica

En las zonas delimitadas en el mapa, se debe trabajar a una escala de mayor detalle, aplicando métodos geológicos-geofísicos que permitirán realizar la detección y delimitación de anomalías en el subsuelo, de posible origen antrópico, que puedan ser vinculadas a antiguas excavaciones para enterramientos clandestinos de personas. Sobre la base de numerosos estudios realizados, se considera que la exploración por métodos geológicos-geofísicos debe ser entre el primer y tercer metro de profundidad, dependiendo si el enterramiento es individual o múltiple.

Dentro de los métodos geofísicos que permiten hacer una exploración de detalle en este tipo de búsqueda, entre los que se ha comprobado que ofrecen resultados satisfactorios y adecuada relación costo-beneficio, se mencionan a la tomografía eléctrica y el geo-radar (GPR)

Tomografía eléctrica: Este método geofísico se basa en medir la resistividad aparente de los materiales del subsuelo, con un dispositivo tetraelectródico determinado (2 electrodos emisores y 2 receptores), con una separación constante denominada "a". Se debe ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado "n", de tal forma que el resultado final será una sección de resistividad aparente a varios niveles "n" en profundidad; datos que posteriormente son tratados por medio

de algoritmos matemáticos de inversión (Aguilera *et al.* 2006, entre otros).

La inversión arroja como resultado una "imagen de resistividades y profundidades verdaderas" que se correlaciona con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc. Las medidas de resistividad aparente del terreno para un estudio por tomografía eléctrica se efectúan mediante técnicas de envío de corriente al subsuelo con posibilidad de empleo de una gran variedad de dispositivos en lo que a la distribución de los electrodos se refiere. El arreglo geométrico considerado más adecuado para el tipo de anomalía correspondiente a una fosa, es el denominado dipolo-dipolo (Aguilera *et al.* 2006).

Combinando adecuadamente resolución lateral y profundidad de investigación, la tomografía eléctrica es, sin duda, una de las herramientas de carácter no destructivo más eficaz para el estudio y caracterización de posibles discontinuidades del subsuelo, con detalle en los primeros metros de profundidad (Fig. 3a).

El equipo utilizado para la medición de resistividades del terreno es un resistímetro digital de alta precisión. El mismo está constituido por un módulo transmisor que envía corriente continua al terreno mediante dos electrodos de emisión y un módulo receptor en el cual se miden las diferencias de potencial producidas.

Al excavar una fosa que posteriormente es tapada se disturban y mezclan los materiales presentes en el subsuelo provocando una modificación en éstos en relación a los adyacentes, que al ser explorada con una tomografía eléctrica se detecta como una anomalía, reconociéndose claramente sus límites y profundidad.

En la figura 3b se presenta una imagen de la distribución de resistividad aparente del terreno obtenida por medio de una tomografía eléctrica, donde se observa una anomalía en el subsuelo, que se interpreta que corresponde a una excavación clandestina cuya edad es de varias décadas. Las dimensiones y profundidad de la anomalía en la gráfica fueron constatadas cuando se excavó el sitio.

Geo-radar: Antiguamente, para la búsqueda de objetos sepultados, se ha contado

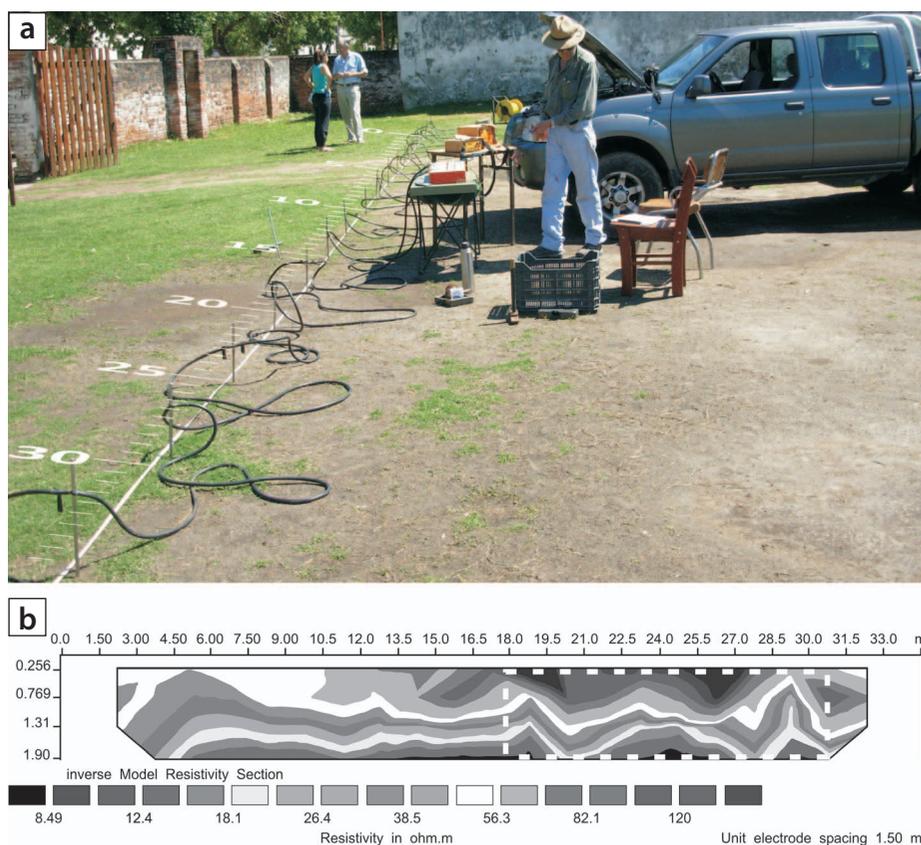


Figura 3: a) Fotografía presentando la disposición de los electrodos durante la realización de una tomografía eléctrica. b) Imagen donde se indica con un rectángulo la anomalía interpretada correspondiente a una fosa de varias décadas de antigüedad.

con el detector de metales y el magnetómetro. Su aplicación en investigaciones forenses dependía de que los objetos enterrados alrededor de una víctima tuviesen respuesta a estas tecnologías. En el caso del detector de metales, éste reacciona ante la presencia de objetos metálicos y puede usarse en forma selectiva. Su sensibilidad es limitada hasta una profundidad máxima de 0,30 m y su efectividad también depende del tamaño del objeto enterrado (Strongman 1992).

El magnetómetro, en cambio, puede hacer una lectura precisa hasta 1 m de profundidad y solo reacciona a los campos magnéticos de los metales ferrosos. Es efectivo solo en zonas descampadas, ya que, como poseen altísima sensibilidad existen numerosas fuentes antrópicas que pueden producir una influencia externa como la corriente eléctrica, cañerías, construcciones con hierro y cualquier objeto de metal presente, tanto es así que el operador no debe llevar

ningún objeto metálico consigo.

En la actualidad, las limitaciones de estos métodos son superadas por la aplicación de la tecnología del geo-radar, la que se considera una forma de teledetección más precisa y confiable (Strongman 1992).

El GPR utiliza los principios básicos de cualquier sistema radar (Strongman 1992), cuenta con cuatro unidades principales: transmisora, receptora, de control y de registro (Fig. 4a).

Un pulso o señal electromagnética es dirigido hacia el subsuelo y se refleja en parte, dependiendo de las propiedades electromagnéticas de los materiales que atraviesa. Este cambio se puede correlacionar con: modificación en el contenido volumétrico de agua, variaciones en la densidad aparente, presencia de contactos, fracturas, vacíos y elementos metálicos. La energía reflejada como una onda, es tomada por la antena receptora del sistema, que determina el tiempo de retardo de la señal, que es la

diferencia entre tiempo de transmisión y recepción (Strongman 1992, González de Vallejo *et al.* 2002).

La señal se repite muchas veces en un segundo y, como el sistema transmisor-receptor se mueve a través de la superficie a explorar, las señales reflejadas definen una visión o perfil transversal del subsuelo que muestra gráficamente los distintos niveles o estados del suelo y la presencia de objetos enterrados o anomalías (Strongman 1992). Las principales ventajas de este sistema son: la rapidez en la adquisición de datos; su versatilidad, ya que posibilita que se pueda realizar el relevamiento del subsuelo no solo donde los sedimentos están aflorando, sino también en sitios donde existen pisos (baldosas, hormigón, pavimento, etc.); y permite explorar a distintas profundidades, debido a la posibilidad de intercambiar antenas con diferentes frecuencias.

Al excavar y tapar una fosa se produce la desagregación y/o mezcla de los sedimentos presentes en el perfil del subsuelo. Esta intervención provoca una modificación en los materiales en relación a los adyacentes, que al ser explorada con un GPR, se detecta como una anomalía que, aun siendo sutil, permite definir claramente sus límites y profundidad (Fig. 4b).

Determinación de propiedades mecánicas del suelo para la ubicación de fosas

Una vez definido el sitio potencial de enterramiento es ventajoso, como actividad previa, abrir una calicata de exploración próxima al sitio donde se considere que no ha sido afectado por la intervención antrópica (excavación de una fosa), para realizar la descripción detallada de los sedimentos presentes en el perfil, definir los espesores de los horizontes edáficos, y obtener un perfil de referencia inalterado. Esta calicata se complementa con un ensayo de penetración para conocer la distribución de la resistencia mecánica de los materiales y correlacionarlos con los distintos horizontes del suelo (Fig. 5). Este perfil tipo permitirá correlacionar sus propiedades con los resultados de las exploraciones posteriores.

Ensayo de penetración: La necesidad de explorar el subsuelo por distintos objetivos de trabajo ha favorecido el desarrollo y adaptación de distintos métodos, dentro

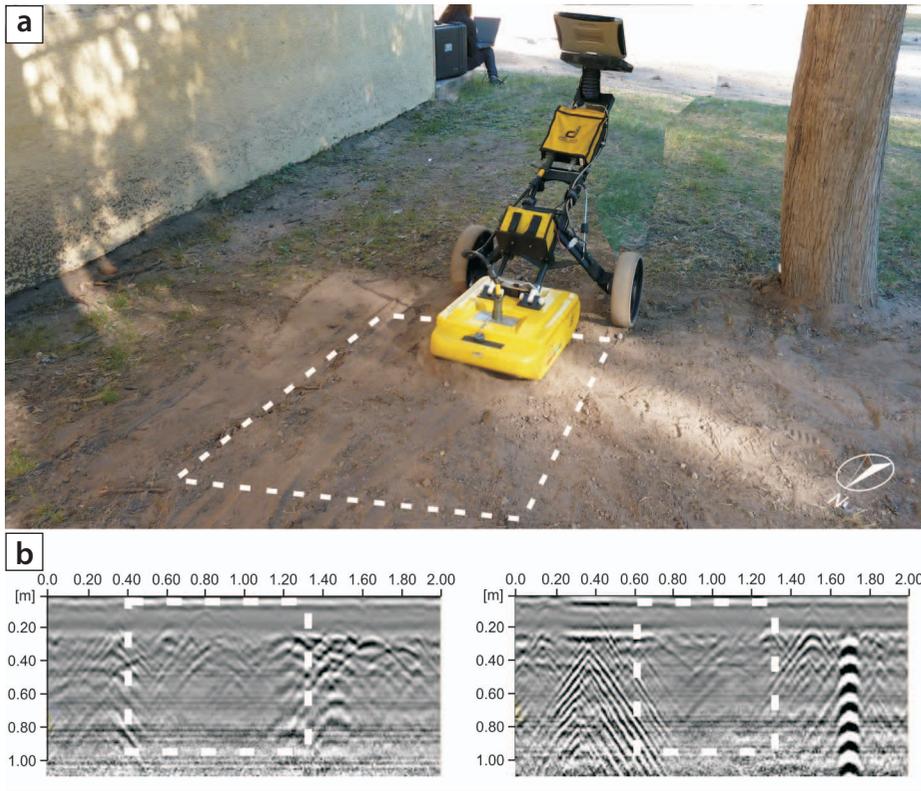


Figura 4: a) Geo-radar relevando una calicata de exploración tapada. b) Radiogramas obtenidas del subsuelo del sitio. La de la derecha tiene una orientación E-O y la de la izquierda N-S.

de los cuales, los ensayos de penetración se consideran importantes ya que permiten determinar una propiedad mecánica del suelo como su resistencia. Una ventaja de esta técnica es que provoca mínimas modificaciones en el estado en que se encuentran los sedimentos. Tanto el penetrómetro normalizado como el *Penetrologger* (Fig. 6) se adaptan a los requerimientos de la búsqueda de fosas tapadas, muros e infraestructuras enterradas (Aguilera *et al.* 2006, Sagripanti *et al.* 2012).

Cuando se han delimitado anomalías con otros métodos, se procede a aplicar un ensayo de tipo directo, con el fin de lograr mayor precisión respecto de las propiedades geomecánicas de los materiales, que facilite la decisión de realizar una intervención mayor (excavación de trinchera) o bien descartar el sitio. Los ensayos de penetración se realizan, con una equidistancia que está en función del tamaño de la anomalía y alineados en dos direcciones perpendiculares entre sí según la geometría de la misma. Estos se efectúan tanto dentro como fuera de la anomalía, para lograr mayor precisión

en su delimitación. La utilización del penetrómetro normalizado o del *Penetrologger* está en función de la antigüedad del enterramiento.

El ensayo de penetración dinámica, con penetrómetro normalizado, consiste en hincar en el suelo una punta cónica normalizada por medio de golpes proporcionados por una pesa que cae libremente desde una altura definida. Estos ensayos proporcionan información continua sobre la resistencia mecánica de los materiales del perfil o terreno explorado hasta la profundidad de 1 m, la que será proporcional a la profundización por cada golpe (Moll *et al.* 1987).

El *penetrologger* ha sido diseñado para medir la resistencia a la penetración hasta una profundidad de 0,80 m. Se realiza hincando en el suelo una varilla metálica, que en su extremo posee una punta cónica normalizada y ejerciendo, en forma manual, una presión vertical sobre la misma. Este equipo, de mayor tecnología, permite hacer un gran número de mediciones en forma rápida y el almacenamiento en forma digital de los datos obtenidos, como así también el

posicionamiento geográfico del sitio de ensayo ya que cuenta con un dispositivo GPS. Los datos obtenidos de estos ensayos permiten elaborar un perfil del suelo con la variación de la resistencia mecánica de los sedimentos en función de la profundidad. Estos resultados se analizan en forma comparativa con el perfil de referencia obtenido previamente, junto con la calicata de exploración, lo que permite definir en forma rápida si se está en presencia de una anomalía.

La obtención de valores de resistencia anómalos de los sedimentos, permite interpretar la posible presencia de una excavación tapada que ha sido posteriormente afectada por la acción antrópica y/o natural (porcentaje de humedad, lixiviación, consolidación o compactación diferencial, etc.), como así también detectar la presencia de elementos enterrados (objetos, muros, etc.) que poseen resistencia distinta a los sedimentos en su estado natural (Fig. 7).

Los ensayos realizados con *Penetrologger* tienen una limitación operativa, comparada con el penetrómetro normalizado, dada por materiales que poseen mayor grado de compactación que, como es de esperar, requieren más presión para hincarse lo que produce una flexión importante de la varilla metálica que puede generar una lectura

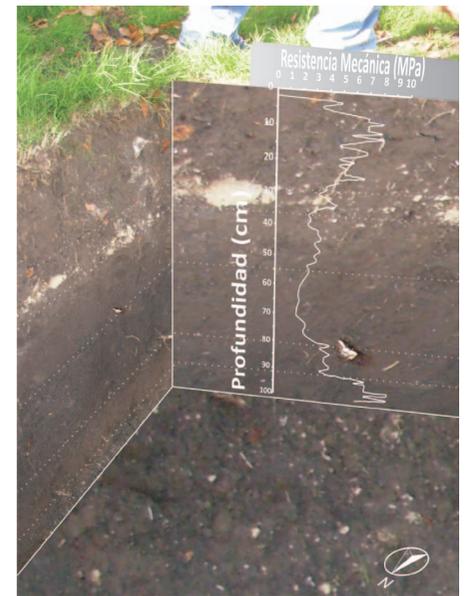


Figura 5: Vista de un perfil litológico de referencia en una calicata y valores de resistencia de los materiales, obtenidos en un ensayo de penetración.

errónea de los datos. Se han realizado ensayos en sedimentos loessoides, con fosas de diferentes tiempos de excavación ($\leq 1, 2, 5, 8$ y 10 años) ubicadas en un Cementerio Municipal y se ha comprobado que los resultados son confiables solo para aquellas que no tengan más de un año de excavadas.

Otra limitación al utilizar estos ensayos, es el tipo de sedimento en el cual se está trabajando, ya que si éstos presentan rodados, escombros o basura, los mismos imposibilitan el funcionamiento normal de los equipos.

Sondeo con barreno manual o pala vizcachera (SPV):

El sondeo con barreno es un procedimiento mecánico manual, que se basa en la rotación de una herramienta de corte que desagrega el terreno y una cuchara que permite almacenar y extraer muestras de detritos (*cutting*) hacia la superficie desde una profundidad conocida. Se emplea solamente en terrenos poco coherentes o de baja dureza (Huarte 1977, González de Vallejo *et al.* 2002).

La utilización de esta herramienta permite

realizar un muestreo continuo de los materiales del perfil, compararlo con el perfil litológico de referencia y hacer una constatación precisa si el lugar explorado fue excavado (Fig. 8a).

En el caso que, sobre el lugar donde se sospecha está ubicada la fosa, se hayan realizado construcciones que posean pisos o bien que se haya pavimentado el lugar, se destaca el uso del SPV porque, a diferencia de otros métodos, se puede acceder al subsuelo y extraer muestras de materiales con la mínima afectación de la obra. Para ello se realiza un corte en el piso, de aproximadamente 30×30 cm, removiendo el contra-piso, si existiese, y dejando expuesto el techo del perfil a investigar (Figs. 8b y 8c).

Método de exploración directa por apertura de trincheras

A partir de la integración e interpretación de los datos obtenidos se determina la potencialidad del sitio, y si esta evaluación es positiva se aplica el método de exploración directa de excavación de trinchera el que, por su costo y grado de perturbación del

área, es un método de aplicación controlado.

Al excavar una fosa, que generalmente supera 1 m de profundidad y con una superficie que dependerá de si el enterramiento es individual o múltiple, se debe movilizar o extraer un importante volumen de material o sedimentos, disturbando los niveles edáficos superiores, principalmente el A que contiene la cobertura vegetal y materia orgánica.

Esta excavación genera irregularidades en la superficie que la diferencian del entorno (distintos sedimentos, humedad, color, vegetación, etc.), por lo tanto, probablemente una fosa reciente, por estas características, sea fácil de identificar. Además, al cerrar o tapar la misma, con posterioridad al depósito de los restos de la víctima, existe un volumen sobrante de sedimento esto es debido, por un lado, al volumen reemplazado por el cuerpo enterrado y, por otro, al estado de desagregación que adquieren los sedimentos al romperse su estructura, por lo tanto la fosa se rellena con materiales menos compactados, y se

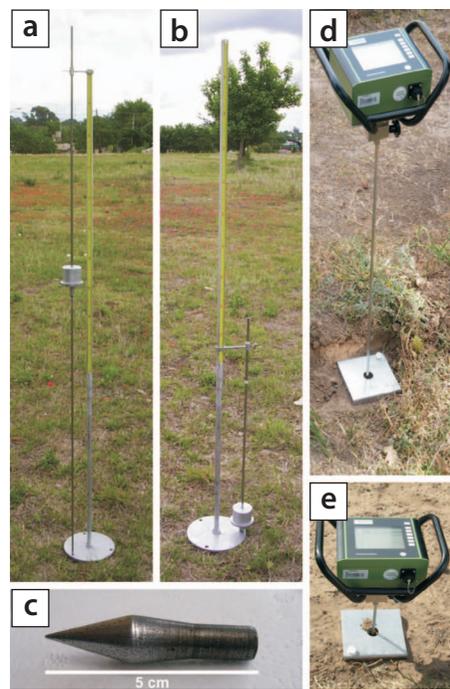


Figura 6: a) Equipo de penetración. b) Posición en la finalización del ensayo. c) Punta cónica normalizada. d) Equipo *penetrologer*. e) Posición del equipo al finalizar el ensayo.

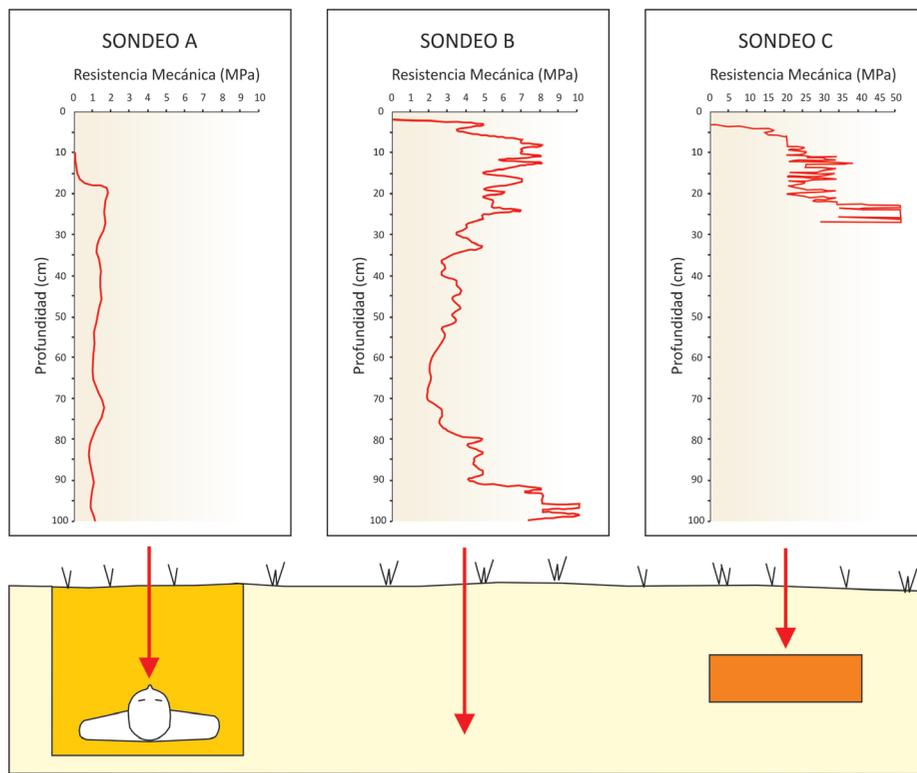


Figura 7: Esquema presentando curvas típicas obtenidas en un ensayo de penetración. Curva de Sondeo A corresponde a un perfil antrópicamente intervenido, curva Sondeo B al perfil de suelo en estado natural y curva Sondeo C a la presencia de un muro oculto en el subsuelo.



Figura 8: a) Perfil litológico reconstruido en superficie con las muestras de materiales del subsuelo obtenidas a distintas profundidades. b) Ejemplo de corte en un piso de cerámicos, dentro de una habitación, para acceder al subsuelo. c) Obtención de los materiales extraídos por la cuchara del barreno manual.

genera una zona positiva aledaña, lo que favorece la ubicación del enterramiento.

Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo un cuerpo enterrado pierde volumen por lo tanto una fosa más antigua puede presentar una superficie deprimida con distinta coloración y diferentes sedimentos debido a la mezcla de materiales, de distintas profundidades. Otra evidencia la aporta la vegetación que se instala posteriormente sobre la fosa ya que, la misma tiene distinto patrón de crecimiento al del entorno (Fig. 9).

La acción de excavar una fosa produce planos de corte en el suelo que se visualizan en el perfil litológico y en la traza de los mismos en superficie. Estos cortes, realizados con herramientas manuales o mecanizadas, son evidencias claras de la intervención antrópica en el medio físico que se pueden preservar durante varias décadas, siendo más visibles si los materiales del perfil presentan mayores diferencias.

La práctica habitual, en la mayoría de los casos, cuando se buscan cuerpos de personas desaparecidas, es hacer una excavación de importantes dimensiones con una pala mecánica sin seguir algún criterio, con todas las consecuencias asociadas que genera

esta forma de intervención. La probabilidad de perder o destruir evidencias es alta, como también es importante el grado de afectación del terreno excavado. Es por ello que se recomienda al comenzar la apertura usar una técnica de excavación superficial, de pocos centímetros de profundidad, ya que el análisis e interpretación de los planos de corte, en los primeros centímetros del perfil, es de vital ayuda para llegar a una sepultura que se encuentra a mayor profundidad (Fig. 10a y 10c).

Esta técnica, probada en varios casos, se considera la más apropiada y económica ya que se inicia la excavación de forma superficial con una pala mecánica pequeña (tipo *bobcat*) haciendo la primer pasada con una profundidad de corte entre los 0,25 y 0,30 m, con el fin de asegurar la remoción de la mayoría de las raíces de la cobertura vegetal y destapar la parte superior de la anomalía (Fig. 10b y 10d). Posteriormente se revisa, con detalle, la superficie destapada tratando de identificar la presencia de algún límite lateral de la fosa buscada o contacto entre materiales en su estado natural y removido, con la ayuda de una pala de mano, *scraper* y cepillos.

Se continúa profundizando la excavación cada 0,25 m y rectificando las paredes del

perfil (con una pala o *scraper*) con el fin de detectar evidencias de intervención antrópica que permitan identificar los límites buscados (Fig. 10a y 10c). En lo posible es conveniente dejar expuesta al aire la superficie a investigar, de manera de obtener otra perspectiva visual de la zona destapada, ya que los distintos materiales responderán diferencialmente según el contenido de humedad inicial.

Por el contrario, en ciertos casos cuando los materiales están más secos, si los límites buscados de la fosa no son bien visibles, éstos se pueden realzar humectando ligeramente la superficie excavada con la ayuda de un rociador (Fig. 11a y 11b).

CONSIDERACIONES FINALES

La experiencia adquirida y resultados obtenidos por la participación en numerosos casos, permiten plantear que desde una Ciencia de la Tierra como la geología se puede prestar una importante colaboración con la justicia y, en el caso particular de Argentina, hacer un invaluable aporte a los DD. HH. y a familiares de desaparecidos durante la dictadura militar y aún en democracia.

Es indudable que en otras áreas del cono-

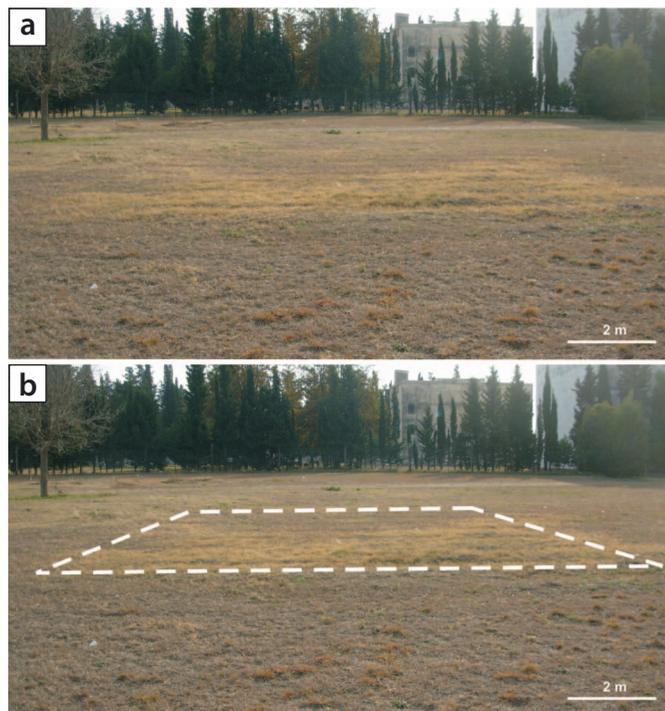


Figura 9: a) Fotografía de un terreno donde se ubica una fosa utilizada para la disposición de residuos, que permanece tapada desde hace alrededor de 15 años. b) La línea de trazos indica el límite de la fosa, delimitando las diferencias en la morfología y en la vegetación.

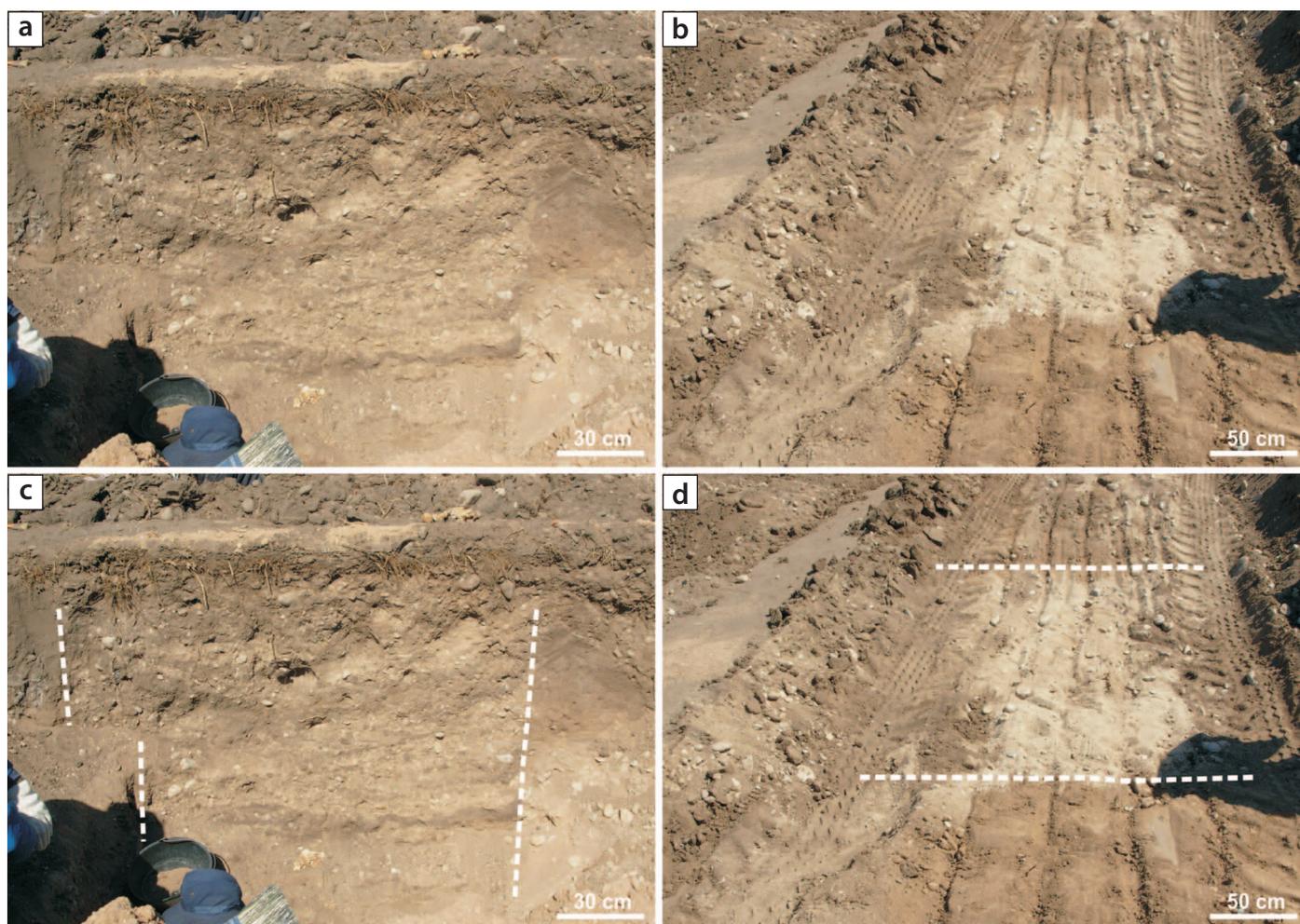


Figura 10: a) Perfil correspondiente a una fosa de enterramiento cuya edad estimada es de alrededor de varias décadas. b) Ejemplo de la técnica de corte superficial del terreno que corresponde a la fosa anterior. c) *Sketch* de “a”, las líneas de trazos indican la evidencia del corte dejado por la intervención antrópica. d) *Sketch* de “b”, las líneas de trazos indican el contacto entre los sedimentos en estado natural y excavados expuestos en el corte superficial.

cimiento de la geología existen profesionales especializados cuyas metodologías se pueden sumar en la etapa de investigación y hacer un mayor aporte a la búsqueda de personas desaparecidas.

La excavación de una fosa para un enterramiento, con herramientas de mano o maquinarias, genera anomalías en el estado natural de los materiales que pueden ser detectadas, interpretadas y delimitadas, y cuya expresión tiene variable persistencia en el tiempo.

Las evidencias de intervención antrópica en la superficie con motivo de una excavación (micro-topografía, falta de vegetación, etc.) son las que pierden su expresión más rápidamente, mientras que las

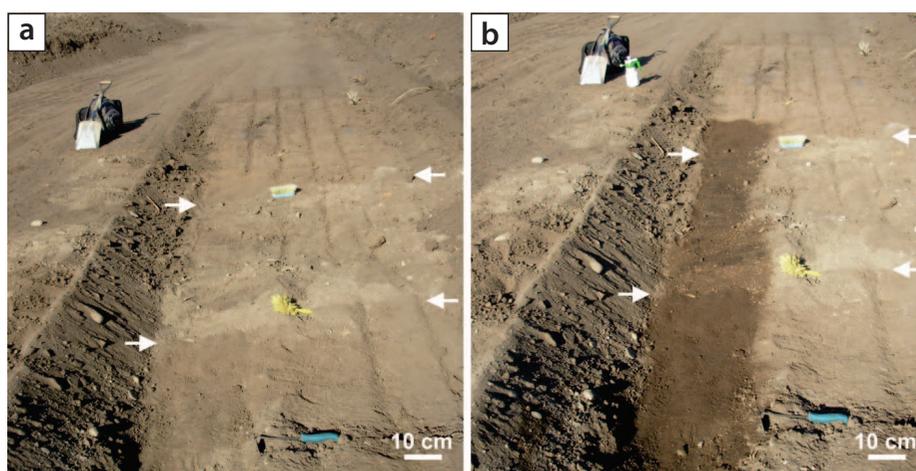


Figura 11: a) Vista del corte superficial del terreno de la fosa presentada en la figura 10, las flechas indican sus límites. b) Vista del mismo corte superficial, humectado para resaltar los límites de la excavación.

que afectan la parte superior del perfil del suelo (planos de corte producidos por herramientas y niveles de sedimentos mezclados), pueden reconocerse, aún, después de varias décadas.

La participación de profesionales de la geología, y la aplicación de los métodos geológicos-geofísicos, se consideran de fundamental importancia en la búsqueda de enterramientos clandestinos de personas, ya que la información que aportan aumenta substancialmente la posibilidad de hallazgo. Entre los métodos a aplicar, con adaptaciones, se destacan el análisis morfo-litológico y aerofotográfico, tomografía eléctrica, GPR, ensayos de penetración geomecánicos, sondeo con barrenos manual y apertura de trincheras.

En el desarrollo de las actividades, las distintas situaciones, favorables o desfavorables, que se han tenido que transitar y los resultados obtenidos dejan una enseñanza que permite plantear que, entre los factores que juegan un rol importante en la etapa de búsqueda, se destacan tres:

- la región geográfica donde se ubica el sitio, accesibilidad al lugar, tipo de enterramiento, precisiones de los testimonios, recursos económicos con que se cuenta, métodos que se puedan aplicar, personal de apoyo y herramientas disponibles.
- la integración del equipo de investigación, que debe ser interdisciplinario ya que esto permite obtener mayor cantidad de opiniones e información para realizar las interpretaciones.
- Es muy importante en las etapas de investigación, cualquiera que sea la metodología aplicada, disponer de tiempo suficiente para realizar la interpretación de la información obtenida, que muchas veces no se condice con los tiempos de la administración y es, sobre la base de ésta, que se tomará la decisión de excavar un sitio o descartarlo.

Es importante lograr la concientización de las autoridades que requieren la investigación del hecho que la optimización del tiempo y del esfuerzo dedicado a la búsqueda se traduce en aumentar la posibilidad de hallazgo.

Se espera que el contenido de esta contribución sea de utilidad a geólogos, antropólogos, arqueólogos, estudiantes y profesio-

cionales, de Argentina y otros países, que trabajen en la búsqueda de restos óseos, objetos y elementos arqueológicos ocultos bajo la superficie, especialmente en casos forenses en los que es necesario hacer un aporte desde una de las Ciencias de la Tierra para acercarse a la verdad y justicia.

AGRADECIMIENTOS

A la Esp. Mónica Villegas (UNRC) y Dra. Mónica Blarasin (UNRC) por su invaluable ayuda en la corrección del manuscrito, lectura crítica y sugerencias que han permitido mejorar el mismo, y principalmente por alentarnos a dar a conocer las actividades de geología forense realizadas. Al Dr. Hugo Schiavo (UNRC) y Dr. Baltazar Parra (UNRC) por su colaboración en la puesta a punto del *penetrologger*. A las autoridades de las universidades nacionales de Río Cuarto y San Luis por autorizarnos a realizar estas actividades. Al editor Dr. Pablo Pazos y a los revisores Dr. Mario Giménez (UNSJ) y anónimo, por sus opiniones sobre la temática abordada, lectura crítica del manuscrito y correcciones que han permitido mejorar este artículo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aguilera, D., Giaccardi, A., Membrives, A., Carra, M. T. y De Grandis, N. 2006. Santa Fe La Vieja, Arqueología de los Siglos XVI y XVII. Geofísica Aplicada a la Arqueología de "Santa Fe La Vieja", Capítulo 7: 9 p., Facultad de Humanidades y Artes, UNR, Rosario.
- CCI 2010. Enciclopedia Criminalística, Criminología e Investigación. Ed. Sigma, 3: 1171-1181, Colombia.
- CONADEP 2006. Nunca Más. Informe de la Comisión Nacional sobre la Desaparición de Personas. Editorial Eudeba, 8va. Edición, 482 p., Buenos Aires.
- CSIC 2009. Terremotos, cuando la Tierra tiembla. Ed. Catarata, Colección Divulgación, 10: 195 p., Madrid.
- EAAF 2009. Tri-annual Report 2006-2009. Equipo Argentino de Antropología Forense, 208 p., Buenos Aires.
- France, D. L., Griffin, T. J., Swanburg, J. G., Lindemann, J. W., Davenport, G. C., Trammell,

M. A., Armbrust, C. T., Kondratieff, B., Nelson, A. y Hopkins, D. 1992. A multidisciplinary approach to the detection of clandestine graves. *Journal of Forensic Sciences*, JFSCA. 37: 1445-1458.

- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oreó, C. 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall. 715 p., Madrid.
- Moll, L. L., Rocca, R. J. y Redolfi, E. R. 1987. Curso de Mecánica de Suelos. Facultad de Ingeniería UNC, Tomo 1: 231-457, Córdoba.
- Murray, R. C. y Tedrow, J. C. F. 1992. Forensic Geology: Earth sciences and criminal investigation. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 240 p., New Jersey.
- Puy Huarte, J. 1977. Procedimientos de Sondeos. Ed. URPE. SA, 552 p., Madrid.
- Pye, K. y Croft, D. 2004. Forensic Geoscience: Principles, Techniques and Applications. Special Publication of the Geological Society of London, 232 p., London.
- Rodríguez Cuenca, J. V. 1994. Introducción a la antropología forense, análisis e identificación de restos óseos humanos. Manual Básico de la carrera de Antropología, Universidad Nacional de Colombia, 181 p., Santiago de Bogotá.
- Ruffell, A. y McKinley, J. 2008. Geoforensics. (ed) John Wiley and Sons Ltd. 332 p., Belfast.
- Sagripanti, G. L., Aguilera, D., Giaccardi, A. y Cornero, S. 2012. Exploraciones geofísicas en arqueología histórica: Iglesia San Francisco Xavier, siglo XIX, San Javier, Santa Fe. Teoría y Práctica de la Arqueología Histórica Latinoamericana, Año 1: 179-188.
- Strongman, K. B. 1992. Forensic applications of ground penetrating radar; in Ground penetrating radar. Ed. J. Pilon, Geological Survey of Canada, 90: 203-211.

Recibido: 16 de octubre, 2012

Aceptado: 27 de enero, 2013